

И. В. БАРБАШОВ, В. Р. ОБУХОВ, Д. С. РЫМОРЕВ

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКИХ НОМИНАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрены схемы замещения и их параметры для протяженных воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений. В линиях сверхвысоких напряжений (от 330 кВ и выше) анализ режимов работы основывается на представлении линии как цепи с распределенными параметрами. Параметры продольных и поперечных элементов П-образной симметричной схемы замещения линий электропередачи определялись с разной степенью точности в зависимости от требований к учету распределенности их параметров. Были рассмотрены основные соотношения, связывающие напряжения и токи по концам протяженной линии (уравнение длинной линии) с её параметрами и представление в расчетах линий сверхвысоких номинальных напряжений пассивными четырехполюсниками с комплексными постоянными. Основное внимание в работе было уделено более наглядному и удобному подходу к определению параметров П-образной схемы замещения линии через удельное сопротивление и проводимости, используя комплексные или действительные поправочные коэффициенты, учитывающие распределенность параметров по длине протяженной воздушной линии. Приведены результаты расчетов для линий 330 кВ при длинах до 500 км и 750 кВ при длинах до 1000 км. Расчеты выполнялись по специально разработанной компьютерной программе.

Ключевые слова: схемы замещения и их параметры воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений, волновой характер передачи электроэнергии, уравнение длинной линии, пассивные четырехполюсники с комплексными постоянными, комплексные и действительные поправочные коэффициенты к удельным сопротивлениям и проводимостям

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

СКЛАДАННЯ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПРОТЯЖНИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ НАДВИСОКИХ НОМІНАЛЬНИХ НАПРУГ

Розглянуті схеми заміщення і їх параметри для протяжних повітряних ліній надвисоких номінальних напруг. У лініях надвисоких напруг (від 330 кВ і вище) аналіз режимів роботи ґрунтується на виставі лінії як ланцюги з розподіленими параметрами. Параметри поздовжніх і поперечних елементів П-образної симетричної схеми заміщення ліній електропередачі визначалися з різним ступенем точності залежно від вимог до обліку розподільності їх параметрів. Були розглянуті основні співвідношення, що зв'язують напруги й струми по кінцях протяжної лінії (рівняння довгої лінії) з її параметрами й вистава в розрахунках ліній надвисоких номінальних напруг пасивними чотириполюсниками з комплексними постійними. Основна увага в роботі було приділено більш наочному й зручному підходу до визначення параметрів П-образної схеми заміщення лінії через питоме опору й провідності, використовуючи комплексні або дійсні поправочні коефіцієнти, що враховують розподільність параметрів по довжині протяжної повітряної лінії. Наведені результати розрахунків для ліній 330 кВ при довжинах до 500 км і 750 кВ при довжинах до 1000 км. Розрахунки виконувалися по спеціально розробленій комп'ютерній програмі.

Ключові слова: схеми заміщення і їх параметри повітряних ліній надвисоких номінальних напруг, хвильовий характер передачі електроенергії, рівняння довгої лінії, пасивні чотириполюсники з комплексними постійними, комплексні й дійсні поправочні коефіцієнти до питомих опорів і провідностей

I. V. BARBASHOV, V. R. OBUKHOV, D. S. RYMORIEV

COMPOSITION OF SCHEME OF SUBSTITUTION AND DETERMINATION OF THEIR PARAMETERS FOR EXTENDED AIR LINES OF ULTRA-HIGH NOMINAL VOLTAGES

The scheme of substitution and their parameters were considered for extended ultra-high rated voltage air lines. In the lines of ultra-high voltages (from 330 kV and above), the analysis of operating modes is based on the representation of the line as a chain with distributed parameters. The parameters of the longitudinal and transverse elements of the U-shaped symmetric equivalent circuit of power transmission lines were determined with varying degrees of accuracy depending on the requirements for taking into account the distribution of their parameters. The main relations relating the voltages and currents at the ends of the extended line (the equation of the long line) with its parameters and representation in the calculations of the lines of ultrahigh nominal voltages by passive quadripoles with complex constants were considered. The focus of the work was paid to a more visual and convenient approach to determining the parameters of the U-shaped line replacement circuit through resistivity and conductivity, using complex or actual correction factors that take into account the distribution of parameters along the length of an extended air line. The calculation results for 330 kV lines with lengths up to 500 km and 750 kV with lengths up to 1000 km were given. The calculations were performed using a specially developed computer program.

Keywords: scheme of substitution and their parameters of ultra-high nominal voltage air lines, wave nature of power transmission, long line equation, passive quadripoles with complex constants, complex and real correction factors for specific resistances and conductivities

Введение. При анализе работы линий напряжением до 330 кВ включительно и длиной 200–300 км в большинстве случаев можно не учитывать волновой характер передачи электроэнергии. Как правило, режим работы таких линий рассчитывается на основе их схем замещения с сосредоточенными параметрами $R_{\text{л}} = r_0 l$, $X_{\text{л}} = x_0 l$, $G_{\text{л}} = g_0 l$ и $B_{\text{л}} = b_0 l$ (рис. 1).

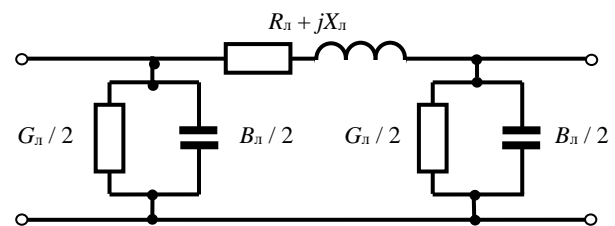


Рис. 1 П-образная схема замещения воздушных линий с сосредоточенными параметрами

© И. В. Барбашов, В. Р. Обухов, Д. С. Рыморев, 2019

В линиях сверхвысоких напряжений (от 330 кВ и выше) появляется необходимость в той или иной мере учитывать волновой характер передачи электроэнергии. Анализ режимов работы подобных линий основывается на представлении их как цепи с распределенными параметрами (рис. 2), где каждый малый элемент линии длиной dl обладает активным $r_0 dl$ и индуктивным $x_0 dl$ сопротивлениями, активной $g_0 dl$ и емкостной $b_0 dl$ проводимостями. При этом считается, что параметры линии ($r_0 dl$, $x_0 dl$, $g_0 dl$ и $b_0 dl$) равномерно распределены вдоль её длины. Такое представление о линии связано с некоторой идеализацией, поскольку ряд факторов, например наличие провеса проводов в пролете, изменяет равномерность распределения индуктивности и емкости проводов; также не постоянна интенсивность коронного разряда по длине провода.

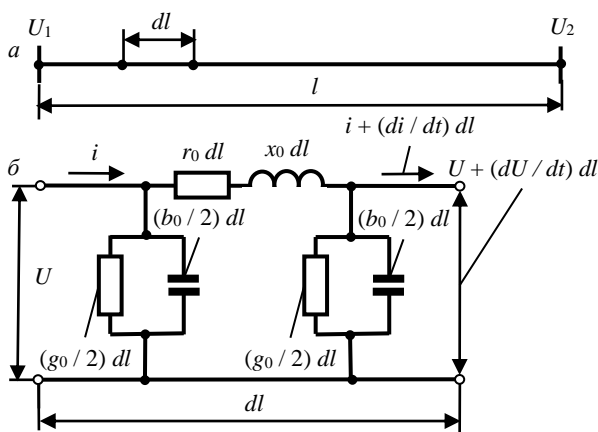


Рис. 2 Участок линии длиной dl с распределенными параметрами (а) и П-образная схема замещения элемента длины dl (б)

Анализ основных достижений и литературы.

Изданное под редакцией проф. Московского энергетического института В. А. Веникова учебное пособие [1] содержит подробное рассмотрение схем замещения электропередач переменного тока и, в частности, схем замещения, представляющих длинные линии.

Также под редакцией проф. В. А. Веникова были изданы учебные пособия «Расчеты и анализ режимов работы сетей» [2], содержащее пример определения параметров П-образной схемы замещения, константы четырехполюсника и коэффициенты уравнения длинной линии для электропередачи 500 кВ длиной 500 км, и «Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях» [3], в котором приведено сопоставление параметров схемы замещения воздушной линии электропередачи 500 кВ при вариации её длины от 250 до 1000 км при различных способах учета распределенности параметров и допущениях об отсутствии потерь на корону и представлении её как линии без потерь. А под редакцией проф. В. А. Строева было издано учебное пособие «Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях» [4], содержащее приближенное

определение параметров схемы замещения воздушной линии электропередачи 500 кВ длиной от 250 до 1000 км, пренебрегая активной проводимостью и приближенно учитывая распределенность параметров по длине вещественными поправочными коэффициентами.

Постановка задачи. Современные линии сверхвысоких напряжений имеют диапазон номинальных напряжений от 330 до 1150 кВ, а их длины варьируются в пределах 250–1000 км и будут, бесспорно, в дальнейшем достигать больших значений. Поэтому рассмотрение схем замещения и их параметров для таких электропередач имеет важное практическое значение.

В изданном в 2017 г. учебном пособии «Параметры и схемы замещения элементов электрических систем в примерах и задачах» [5] линии 330 кВ рассматривались при длинах до 500 км, 500 кВ – до 750 км, 750 кВ – до 1000 км, 1150 кВ – до 1500 км.

Дальнейшие исследования, связанные с составлением схем замещения и определением их параметров для протяженных воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений, должны включать рассмотрение схем замещения и их параметров для линий электропередачи протяженностью, соответствующей длине, близкой к полуволновой (примерно до 3000 км).

Основные подходы и соотношения, используемые при составлении схем замещения и определение их параметров для протяженных воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений. Параметры продольных и поперечных элементов П-образной симметричной схемы замещения линий электропередачи могут быть определены с разной степенью точности в зависимости от требований к учету распределенности их параметров по длине [6].

Основные соотношения, связывающие напряжения \underline{U}_1 , \underline{U}_2 и токи \underline{I}_1 , \underline{I}_2 по концам протяженной линии (уравнение длинной линии) с её параметрами $\underline{Z}_{вол}$, γ_0 , l имеют вид

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 l) + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_{вол} \operatorname{sh}(\gamma_0 l); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) (\underline{U}_2 / \underline{Z}_{вол}) \operatorname{sh}(\gamma_0 l) + \underline{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 l),\end{aligned}$$

где $\underline{Z}_{вол}$ – волновое сопротивление линии, Ом; $\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$ – коэффициент распространения волны на единицу длины, 1/км.

Волновое сопротивление $\underline{Z}_{вол}$ и коэффициент распространения волны γ_0 определяются через её удельные параметры по выражениям

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{вол} &= \sqrt{(z_0 / y_0)} = \sqrt{[(r_0 + jx_0) / (g_0 + jb_0)]} = \underline{Z}_{вол} \angle \xi; \\ \gamma_0 &= \sqrt{(z_0 y_0)} = \sqrt{[(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)]} = \gamma_0 \angle \zeta = \beta_0 + j\alpha_0,\end{aligned}$$

где β_0 – коэффициент затухания; α_0 – коэффициент изменения фазы.

В свою очередь, параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений $\underline{Z}_л$ и $\underline{Y}_л$ могут быть получены как

$$\begin{aligned}\underline{Z}_л &= \underline{B} / \underline{A} = \underline{Z}_{вол} \operatorname{sh}(\gamma_0 l), \\ \underline{Y}_л &= (\underline{A} - 1) / \underline{B} = [\operatorname{ch}(\gamma_0 l) - 1] / [\underline{Z}_{вол} \operatorname{sh}(\gamma_0 l)] =\end{aligned}$$

$$= (2 / Z_{\text{вол}}) \operatorname{th} (\gamma_0 l / 2).$$

Линии сверхвысоких номинальных напряжений в расчетах могут представляться пассивными четырехполюсниками с комплексными постоянными \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} . Эти постоянные определяются по параметрам линии $Z_{\text{л}}$ и $Y_{\text{л}}$

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + (Z_{\text{л}} Y_{\text{л}}) / 2, \quad \underline{B} = Z_{\text{л}}, \quad \underline{C} = Y_{\text{л}} [1 + (Z_{\text{л}} Y_{\text{л}}) / 4]$$

либо по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии,

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch} (\gamma_0 l), \quad \underline{B} = Z_{\text{вол}} \operatorname{sh} (\gamma_0 l), \quad \underline{C} = (1 / Z_{\text{вол}}) \operatorname{sh} (\gamma_0 l).$$

На практике более наглядно и удобно определять параметры П-образной схемы замещения линии через удельное сопротивление z_0 , проводимость y_0 и поправочные коэффициенты K_Z и K_Y , учитывающие распределенность параметров по длине, т. е. по формулам:

$$Z_{\text{л}} = (z_0 l) K_Z; \quad Y_{\text{л}} = (y_0 l) K_Y,$$

где $K_Z = \operatorname{sh} (\gamma_0 l) / (\gamma_0 l)$; $K_Y = \operatorname{th} (\gamma_0 l / 2) / (\gamma_0 l / 2)$.

Так как для определения K_Z и K_Y требуется вычисление гиперболических функций, в качестве первого приближения используют разложение правой части K_Z и K_Y в ряд и ограничиваются его первыми двумя членами.

$$\text{Тогда } K_Z \approx K_Z' = 1 + (\gamma_0 l)^2 / 6;$$

$$K_Y \approx K_Y' = 1 - (\gamma_0 l)^2 / 12.$$

Поскольку K_Z и K_Y – комплексные величины, более удобно использовать действительные поправочные коэффициенты непосредственно для каждого из сопротивлений и проводимостей схемы замещения, т. е. определение её параметров в виде

$$R_{\text{л}} = (r_0 l) k_R; \quad X_{\text{л}} = (x_0 l) k_X;$$

$$G_{\text{л}} = (g_0 l) k_G; \quad B_{\text{л}} = (b_0 l) k_B,$$

где $k_R = (1 - x_0 b_0 l^2 / 3) + [1 - (x_0 / r_0)^2] r_0 g_0 l^2 / 6$;
 $k_X = 1 - (x_0 b_0 l^2 / 6) [(1 - (r_0 / x_0)^2) + r_0 g_0 l^2 / 3]$;
 $k_G = (1 + x_0 b_0 l^2 / 6) + [(b_0 / g_0)^2 - 1] r_0 g_0 l^2 / 12$;
 $k_B = (1 + x_0 b_0 l^2 / 12) - [2 + g_0 x_0 / (b_0 r_0)] r_0 g_0 l^2 / 12.$

Анализ выражений для k_R , k_X и k_B показывает, что их значения в основном определяются первыми слагаемыми, которые не зависят от $G_{\text{л}} = g_0 l$.

$$\text{Тогда } k_R' = 1 - x_0 b_0 l^2 / 3;$$

$$k_X' = 1 - (x_0 b_0 l^2 / 6) [(1 - (r_0 / x_0)^2)];$$

$$k_B' = 1 + x_0 b_0 l^2 / 12.$$

Обычно эти выражения используются при определении $R_{\text{л}}$, $X_{\text{л}}$ и $B_{\text{л}}$, когда при расчетах пренебрегают потерями активной мощности на корону, принимая $g_0 = 0$.

Примечание. В последнем случае в схеме замещения, строго говоря, должна присутствовать ветвь с эквивалентной активной проводимостью, отличной от нуля, обусловленная тем, что, несмотря на допущение об отсутствии потерь на корону, коэффициент K_Y остается комплексной величиной, а следовательно, $Y_{\text{л}}$ будет содержать вещественную компоненту. Однако в силу её малости при $l \leq 1000$ км этой составляющей обычно пренебрегают, полагая $Y_{\text{л}} = j b_0 l k_B'$.

При рассмотрении идеализированной линии (линии без потерь, в которой r_0 и g_0 равны нулю) её реактивные параметры определяются с помощью коэффициентов

$$k_X'' = 1 - x_0 b_0 l^2 / 6; \quad k_B'' = 1 + x_0 b_0 l^2 / 12.$$

Примечание. В статье рассматриваются воздушные линии напряжениями 330 и 750 кВ, соответствующими основной шкале номинальных напряжений, принятых на Украине.

Результаты составления схем замещения и определение их параметров для воздушной линии 330 кВ, выполненной проводами 2×АС–400/51, расположенными горизонтально ($D = 8,7$ м).

1. Удельное активное сопротивление воздушной линии $r_0 = 0,0741 / 2 = 0,03705$ Ом/км принимается по справочным данным приложения А [5].

2. Удельное индуктивное сопротивление воздушной линии

$$x_0 = 0,144 \lg (2 D_{\text{ср}} / d_{\text{эк}}) + 0,0157 / n_p,$$

где $D_{\text{ср}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами линии; для заданного горизонтального расположения фаз $D_{\text{ср}} = 1,26 D = 1,26 \cdot 8,7 \approx 11$ м; $d_{\text{эк}}$ – эквивалентный диаметр расщепленной фазы

$$d_{\text{эк}} = 2^{n_p} \sqrt{\{[a_p / (2 \sin (\pi / n_p))]\}^{(n_p - 1)} (d / 2) n_p},$$

где n_p – число проводов в фазе; $n_p = 2$; a_p – среднее геометрическое расстояние между проводами в фазе; $a_p = 0,4$ м; d – диаметр провода; для провода АС–400/51 $d_{\text{пр}} = 27,5$ мм (приложение А [5]).

Тогда

$$d_{\text{эк}} = 2^{2\sqrt{\{[400 / (2 \sin (\pi / 2))]\} (27,5 / 2) 2}} = 148,32 \text{ мм};$$

$$x_0 = 0,144 \lg (2 \cdot 11000 / 148,32) + 0,0157 / 2 = 0,321 \text{ Ом/км}.$$

3. Удельная емкостная проводимость воздушной линии

$$b_0 = 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 D_{\text{ср}} / d_{\text{эк}}) =$$

$$= 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 \cdot 11000 / 148,32) =$$

$$= 3,491 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

4. Удельная зарядная мощность, генерируемая воздушной линией,

$$q_0 = b_0 U^2 = b_0 (1,05 U_{\text{ном}})^2 = 3,491 \cdot 10^{-6} (1,05 \cdot 330)^2 = 0,419 \text{ Мвар/км}.$$

Примечание. Зарядная мощность q_0 подсчитывается для воздушной линии 330 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $1,05 U_{\text{ном}}$.

5. Удельные активные потери мощности (на корону) воздушной линии $\Delta P_{\text{кор } 0 \text{ нб}} = 2,6$ кВт/км и $\Delta P_{\text{кор } 0 \text{ нм}} = 1,8$ кВт/км принимаются по справочным данным приложения А [5].

$$\text{Тогда } \Delta P_{\text{кор } 0} \approx (2,6 + 1,8) / 2 = 2,2 \text{ кВт/км}.$$

6. Удельная активная проводимость воздушной линии

$$g_0 = \Delta P_{\text{кор } 0} / (1,05 U_{\text{ном}})^2 = 2,2 \cdot 10^{-3} / (1,05 \cdot 330)^2 =$$

$$= 0,018 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Примечание. Активная проводимость g_0 подсчитывается для воздушной линии 330 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $1,05 U_{ном}$.

7. Экономическая плотность тока для провода $2 \times AC-400/51$ принимается равной $j_{эк} = 1 \text{ А/мм}^2$.

Тогда экономическая мощность воздушной линии $S_{эк} = \sqrt{3} I_{эк} U_{ном} = \sqrt{3} (1 \cdot 2 \cdot 400) 330 \cdot 10^{-3} \approx 457 \text{ МВА}$.

8. Отношения удельного индуктивного и активного сопротивлений воздушной линии равно $x_0 / r_0 = 0,321 / 0,037 \approx 8,7$. Значения x_0 существенно превосходят значения r_0 , которые могут не учитываться в схемах замещения воздушных линий 330 кВ.

9. Отношение удельной зарядной и экономической мощностей воздушной линии равно $q_0 / S_{эк} = 0,419 / 457 = 0,0009$. Значение q_0 составляет примерно 0,09 % от $S_{эк}$. Для реальной воздушной линии 330 кВ при $l = 250 \text{ км}$ значение $Q_{зар}$ составляет примерно 23 % от $S_{эк}$, и зарядную мощность следует учитывать в схемах замещения воздушных линий 330 кВ.

10. Полное удельное сопротивление воздушной линии равно

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 = (0,037 + j0,321) = 0,3231 \angle 83,425^\circ \text{ Ом/км.}$$

11. Полная удельная проводимость воздушной линии равна

$$\underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = (0,018 + j3,491) 10^{-6} = 3,4910 \cdot 10^{-6} \angle 89,705^\circ \text{ См/км.}$$

12. Полные удельные поперечные мощности в схемах замещения воздушной линии равны

$$\underline{S}_{\text{поп}} = \Delta P_{\text{кор } 0} - jq_0 = (0,0022 - j0,419) \text{ МВА/км.}$$

13. Для воздушной линии 330 кВ длиной $l = 250 \text{ км}$ сосредоточенные параметры П-образной схемы замещения равны

$$\underline{Z}_л = R_л + jX_л = (r_0 + jx_0) l / n_{\text{ц}} = (0,037 + j0,321) 250 / 1 = (9,25 + j80,25) = 80,781 \angle 83,425^\circ \text{ Ом;}$$

$$\underline{Y}_л = G_л + jB_л = (g_0 + jb_0) l n_{\text{ц}} = (0,018 + j3,491) 10^{-6} \cdot 250 \cdot 1 = (4,50 + j872,25) 10^{-6} = 872,75 \cdot 10^{-6} \angle 89,70^\circ \text{ Ом;}$$

$$\underline{S}_{\text{поп}} = \Delta P_{\text{кор}} - jQ_{\text{зар}} = (\Delta P_{\text{кор } 0} - jq_0) l n_{\text{ц}} = (0,0022 - j0,419) 250 \cdot 1 = (0,550 - j104,750) \text{ МВА.}$$

14. Волновые параметры (волновое сопротивление $\underline{Z}_{\text{вол}}$ и коэффициент распространения волны $\underline{\gamma}_0$) для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ

$$\underline{Z}_{\text{вол}} = \sqrt{[(0,3231 \angle 83,425^\circ) / (3,4910 \cdot 10^{-6} \angle 89,705^\circ)]} = 304,234 \angle -3,140^\circ = (303,777 - j16,664) \text{ Ом;}$$

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{[(0,3231 \angle 83,425^\circ) (3,4910 \cdot 10^{-6} \angle 89,705^\circ)]} = 1,062 \cdot 10^{-3} \angle 86,564^\circ = (0,0636 + j1,0602) 10^{-3} \text{ 1/км.}$$

15. Основные соотношения, связывающие напряжения $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ и токи $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ по концам протяженной линии (уравнение длинной линии),

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \text{ ch } (\underline{\gamma}_0 l) + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh } (\underline{\gamma}_0 l);$$

$$\underline{I}_1 = (1 / \sqrt{3}) (\underline{U}_2 / \underline{Z}_{\text{вол}}) \text{ sh } (\underline{\gamma}_0 l) + \underline{I}_2 \text{ ch } (\underline{\gamma}_0 l).$$

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250 \text{ км}$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 (0,9652 \angle 0,247^\circ) + \sqrt{3} \underline{I}_2 (79,8423 \angle 83,506^\circ);$$

$$\underline{I}_1 = (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (0,8626 \cdot 10^{-3} \angle 89,785^\circ) + \underline{I}_2 (0,9652 \angle 0,247^\circ).$$

16. Постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии,

$$\underline{A} = \underline{D} = \text{ch}(\underline{\gamma}_0 l); \quad \underline{B} = \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh } (\underline{\gamma}_0 l); \quad \underline{C} = [\text{sh}(\underline{\gamma}_0 l) / \underline{Z}_{\text{вол}}].$$

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250 \text{ км}$

$$\underline{A} = \underline{D} = 0,9652 \angle 0,247^\circ; \quad \underline{B} = 79,8423 \angle 83,506^\circ \text{ Ом;}$$

$$\underline{C} = 0,8626 \cdot 10^{-3} \angle 89,785^\circ \text{ См.}$$

17. Параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений $\underline{Z}_л$ и $\underline{Y}_л$ с учетом распределенности их параметров по длине линии

$$\underline{Z}_л = \underline{Z}_{\text{вол}} \text{ sh } (\underline{\gamma}_0 l); \quad \underline{Y}_л = (2 / \underline{Z}_{\text{вол}}) \text{ th } (\underline{\gamma}_0 l / 2).$$

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250 \text{ км}$

$$\underline{Z}_л = 79,8423 \angle 83,506^\circ = (9,0304 + j79,3300) \text{ Ом;}$$

$$\underline{Y}_л = (0,8779 \cdot 10^{-3} \angle 89,664^\circ) = (5,1485 + j877,8729) 10^{-6} \text{ См.}$$

Примечание. Соотношения, связывающие напряжения $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ и токи $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ по концам протяженной линии с учетом распределенности её параметров по длине, постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии, с учетом распределенности её параметров по длине, а также параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений $\underline{Z}_л$ и $\underline{Y}_л$ с учетом распределенности её параметров по длине были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 330 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета.

20. Параметры П-образной схемы замещения линии через удельные сопротивление \underline{z}_0 и проводимость \underline{y}_0 и поправочные коэффициенты \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , учитывающие распределенность параметров по длине протяженной линии,

$$\underline{Z}_л = (\underline{z}_0 l) \underline{K}_Z; \quad \underline{Y}_л = (\underline{y}_0 l) \underline{K}_Y,$$

где $\underline{K}_Z = \text{sh}(\underline{\gamma}_0 l) / (\underline{\gamma}_0 l)$; $\underline{K}_Y = \text{th}(\underline{\gamma}_0 l / 2) / (\underline{\gamma}_0 l / 2)$.

В качестве первого приближения при определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y также рассчитывались значения $\underline{K}_Z \approx \underline{K}_Z' = 1 + (\underline{\gamma}_0 l)^2 / 6$ и $\underline{K}_Y \approx \underline{K}_Y' = 1 - (\underline{\gamma}_0 l)^2 / 12$.

Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250$ и 500 км были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 330 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета, и приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для воздушной линии 330 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км	
	250	500
\underline{K}_Z	$0,9884 \angle 0,0809^\circ$	$0,9540 \angle 0,3283^\circ$
\underline{K}_Y	$1,0059 \angle -0,0406^\circ$	$1,0240 \angle -0,1665^\circ$
\underline{K}_Z'	$0,9883 \angle 0,0815^\circ$	$0,9534 \angle 0,3379^\circ$
\underline{K}_Y'	$1,0058 \angle -0,0400^\circ$	$1,0233 \angle -0,1574^\circ$

Определенные по выражениям пункта 20 расчета зависимости модулей (Z_l , Y_l) и аргументов (φ_Z , φ_Y) комплексов \underline{Z}_l и \underline{Y}_l для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при разных её длинах адекватно отображают её волновые свойства. Полученные зависимости Z_l , Y_l , φ_Z и φ_Y от длины линии могут служить эталоном для сопоставления с ними аналогичных зависимостей, полученных при разных допущениях.

Анализ данных табл. 1 показывает:

1) поправочные коэффициенты представляют собой практически действительные числа, которые тем ближе к единице, чем меньше длина линии. Для участков линий с длиной 250 и 500 км отличие модулей K_Z от 1 составляет 1,2 и 4,6 %, а модулей K_Y – 0,6 и 2,4 %. Отличием модулей K_Z и K_Y от 1 (1,2 и 0,6 % соответственно) при длине линии $l \leq 250$ км обычно пренебрегают;

2) погрешность в определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' по приближенным формулам, то есть отличие модулей K_Z' от K_Z и K_Y' от K_Y растет с увеличением длины и достигает при $l = 500$ км примерно 0,07 % для K_Z' и K_Y' . Это дает основание при длинах линии 330 кВ $l \leq 500$ км использовать вместо поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y более простые выражения для \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' .

Для рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при длине $l = 250$ км через поправочные коэффициенты \underline{K}_Z и \underline{K}_Y

$$\begin{aligned}\underline{Z}_l &= 79,8423 \angle 83,506^\circ = (9,0304 + j79,3300) \text{ Ом}; \\ \underline{Y}_l &= (0,8779 \cdot 10^{-3} \angle 89,664^\circ) = \\ &= (5,1485 + j877,8729) 10^{-6} \text{ См},\end{aligned}$$

а через поправочные коэффициенты \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y'

$$\begin{aligned}\underline{Z}_l &= 79,8390 \angle 83,506^\circ = (9,0293 + j79,3268) \text{ Ом}; \\ \underline{Y}_l &= (0,8779 \cdot 10^{-3} \angle 89,665^\circ) = \\ &= (5,1397 + j877,8376) 10^{-6} \text{ См}.\end{aligned}$$

21. Действительные поправочные коэффициенты непосредственно для каждого из сопротивлений и проводимостей схемы замещения рассматриваемой воздушной линии 330 кВ при разных её длинах были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 330 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 данного расчета, и приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения поправочных коэффициентов k_R , k_X , k_G , k_B , а также k_R' , k_X' и k_B' или k_X'' и k_B'' для воздушной линии 330 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км	
	250	500
k_R	0,9761	0,9046
k_X	0,9885	0,9540
k_G	1,1421	1,5686
k_B	1,0058	1,0233
k_R'	0,9767	0,9066
k_X'	0,9885	0,9539
k_B'	1,0058	1,0233
k_X''	0,9883	0,9533
k_B''	1,0058	1,0233

Анализ данных табл. 2 показывает, что выводы о возможности отказа от учета распределенности параметров при $l \leq 250$ км, полученные выше при исследовании изменения \underline{K}_Z и \underline{K}_Y (\underline{K}_Z' и \underline{K}_Y') при вариации длины линии (см. табл. 1), аналогичны и при рассмотренном подходе, поскольку значения k_R , k_X , k_G и k_B при $l = 250$ км мало отличаются от единицы. Сопоставление точных и приближенных значений k_R' , k_X' и k_B' показывает, что допущение об отсутствии потерь на корону, то есть пренебрежение второй слагаемой в формулах расчета k_X и k_B практически не сказывается на значениях k_X' и k_B' ($k_X \approx k_X'$, $k_B \approx k_B'$), а отличие k_R' от k_R при $l = 250$ и 500 км не превосходит 0,06 и 0,24 % соответственно. Переход к рассмотрению идеализированной линии связан только с изменением поправочного коэффициента к индуктивному сопротивлению, при этом отличие k_X'' от k_X' при $l = 500$ км составляет приблизительно 0,06 %. Таким образом, при длинах линий $l \leq 500$ км в использовании более точных выражений для k_R , k_X , k_G и k_B нет практической необходимости и, в зависимости от принятых допущений, достаточно использовать для расчетов поправочных

коэффициентов выражения для k_R' , k_X' и k_B' или k_X и k_B .

Полученные в табл. 2 результаты позволяют представить полную и расчетную схемы замещения воздушной линии 330 кВ, показанные на рис. 3, а, б схемами, соответствующими случаям:

1) при допущении об отсутствии потерь активной мощности на корону ($G_{\text{л}} = 0$) (рис. 3, в), т. е.

$$\underline{Z}_{\text{л}} = R_{\text{л}} + jX_{\text{л}} = r_0 l k_R' + jx_0 l k_X'; \\ Y_{\text{л}} = jB_{\text{л}} = jb_0 l k_B';$$

2) при допущении о полном отсутствии потерь активной мощности ($R_{\text{л}} = 0$; $G_{\text{л}} = 0$) (рис. 3, з), т. е.

$$Z_{\text{л}} = jX_{\text{л}} = jx_0 l k_X'; Y_{\text{л}} = jB_{\text{л}} = jb_0 l k_B'.$$

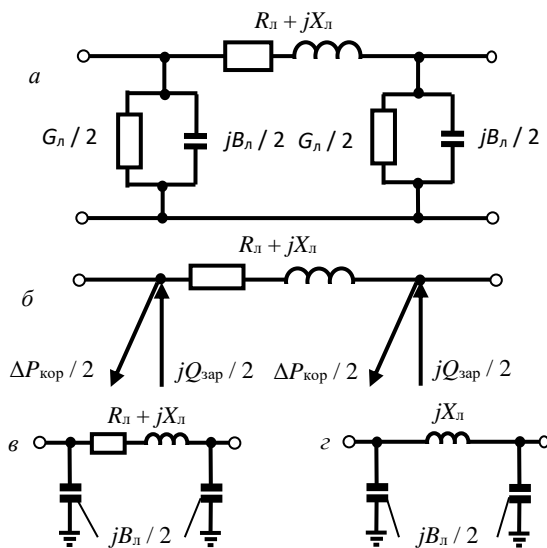


Рис. 3 – П-образные схемы замещения воздушных линий сверхвысоких номинальных напряжений: а и б – полная и расчетная; в – при допущении об отсутствии потерь на корону ($G_{\text{л}} = 0$); з – при допущении о полном отсутствии потерь активной мощности ($R_{\text{л}} = 0$; $G_{\text{л}} = 0$)

Результаты составления схем замещения и определение их параметров для воздушной линии 750 кВ, выполненной проводами 4×AC–500/64, расположенными горизонтально ($D = 15,5$ м).

1. Удельное активное сопротивление воздушной линии $r_0 = 0,0604 / 4 = 0,0151$ Ом/км принимается по справочным данным из приложения А [5].

2. Удельное индуктивное сопротивление воздушной линии

$$x_0 = 0,144 \lg (2 D_{\text{ср}} / d_{\text{эк}}) + 0,0157 / n_{\text{р}},$$

где $D_{\text{ср}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами линий; для заданного горизонтального расположения фаз воздушной линии $D_{\text{ср}} = 1,26 D = 1,26 \cdot 15,5 \approx 19,5$ м; $d_{\text{эк}}$ – эквивалентный диаметр расщепленной фазы

$$d_{\text{эк}} = 2 \sqrt[n_{\text{р}}]{[a_{\text{р}} / (2 \sin (\pi / n_{\text{р}}))]^{(n_{\text{р}} - 1)} (d / 2) n_{\text{р}}};$$

$n_{\text{р}}$ – число проводов в фазе; $n = 4$; $a_{\text{р}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами в фазе;

$a_{\text{р}} = 0,6$ м; d – диаметр провода; для провода AC–500/64 $d = 30,6$ мм (приложение А [5]).

Тогда

$$d_{\text{эк}} = 2 \sqrt[4]{\{[600 / (2 \sin (\pi / 4))]\}^3 (30,6 / 2) 4} = 523,09 \text{ мм};$$

$$x_0 = 0,144 \lg (2 \cdot 19500 / 523,09) + 0,0157 / 4 = 0,274 \text{ Ом/км}.$$

3. Удельная емкостная проводимость воздушной линии

$$b_0 = 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 D_{\text{ср}} / d_{\text{эк}}) = 7,58 \cdot 10^{-6} / \lg (2 \cdot 19500 / 523,09) = 4,048 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

4. Удельная зарядная мощность, генерируемая воздушной линией,

$$q_0 = b_0 U_{\text{ном}}^2 = 4,048 \cdot 10^{-6} \cdot 750^2 = 2,277 \text{ Мвар/км}.$$

Примечание. Зарядная мощность q_0 подсчитывается для воздушной линии 750 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $U_{\text{ном}}$.

5. Удельные активные потери мощности (на корону) воздушной линии $\Delta P_{\text{кор}0} = 16,6$ кВт/км принимаются по справочным данным приложения А [5].

6. Удельная активная проводимость воздушной линии

$$g_0 = \Delta P_{\text{кор}0} / U_{\text{ном}}^2 = 16,6 \cdot 10^{-3} / 750^2 = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ См/км}.$$

Примечание. Активная проводимость g_0 подсчитывается для воздушной линии 750 кВ по среднеэксплуатационному напряжению $U_{\text{ном}}$.

7. Экономическая плотность тока для провода 4×AC–500/64 принимается равной $j_{\text{эк}} = 1$ А/мм².

Тогда экономическая мощность воздушной линии

$$S_{\text{эк}} = \sqrt{3} I_{\text{эк}} U_{\text{ном}} = \sqrt{3} (1 \cdot 4 \cdot 500) 750 \cdot 10^{-3} \approx 5196 \text{ МВА}.$$

8. Отношение удельного индуктивного и активного сопротивлений воздушной линии равно $x_0 / r_0 = 0,274 / 0,01475 = 18,6$. Значение x_0 существенно превосходит значение r_0 , которое может не учитываться в схемах замещения воздушных линий 750 кВ.

9. Отношение удельной зарядной и экономической мощностей воздушной линии равно $q_0 / S_{\text{эк}} = 2,277 / 5196 = 0,00044$. Значение q_0 составляет примерно 0,044 % от $S_{\text{эк}}$. Для реальной воздушной линии 750 кВ при $l = 500$ км значение $Q_{\text{зар}}$ составляет примерно 22 % от $S_{\text{эк}}$, и зарядную мощность следует учитывать в схемах замещения воздушных линий 750 кВ.

10. Полное удельное сопротивление воздушной линии равно:

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 = (0,015 + j0,274) = 0,2744 \angle 86,846^\circ \text{ Ом/км}.$$

11. Полная удельная проводимость воздушной линии равна:

$$\underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = (0,0282 + j4,048) 10^{-6} = 4,0481 \cdot 10^{-6} \angle 89,601^\circ \text{ См/км}.$$

12. Полные удельные поперечные мощности в схемах замещения воздушной линии равны:

$$\Delta P_{\text{поп } 0} = \Delta P_{\text{кор } 0} - j q_0 = (0,0166 - j 2,277) \text{ МВА/км.}$$

13. Волновые параметры (волновое сопротивление $Z_{\text{вол}}$ и коэффициент распространения волны γ_0) для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ:

$$\begin{aligned} Z_{\text{вол}} &= \sqrt{[(0,2744 \angle 86,846^\circ) / (4,0481 \cdot 10^{-6} \angle 89,601^\circ)]} = \\ &= 260,363 \angle -1,378^\circ \text{ Ом;} \\ \gamma_0 &= \sqrt{[(0,2744 \angle 86,846^\circ) (4,0481 \cdot 10^{-6} \angle 89,601^\circ)]} = \\ &= 1,0540 \cdot 10^{-3} \angle 88,223^\circ = \\ &= (0,03268 + j 1,0535) 10^{-3} 1/\text{км.} \end{aligned}$$

14. Основные соотношения, связывающие напряжения \underline{U}_1 , \underline{U}_2 и токи \underline{I}_1 , \underline{I}_2 по концам протяженной линии (уравнение длинной линии):

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 l) + \sqrt{3} \underline{I}_2 Z_{\text{вол}} \operatorname{sh}(\gamma_0 l); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) (\underline{U}_2 / Z_{\text{вол}}) \operatorname{sh}(\gamma_0 l) + \underline{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma_0 l). \end{aligned}$$

Для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ:

а) при длине $l = 500$ км

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 (0,8646 \angle 0,543^\circ) + \sqrt{3} \underline{I}_2 (130,9568 \angle 87,232^\circ); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (1,9318 \cdot 10^{-3} \angle 89,768^\circ) + \\ &+ \underline{I}_2 (0,8646 \angle 0,543^\circ); \end{aligned}$$

б) при длине $l = 750$ км

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 (0,7042 \angle 1,417^\circ) + \\ &+ \sqrt{3} \underline{I}_2 (185,0781 \angle -91,382^\circ); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (2,7302 \cdot 10^{-3} \angle 89,987^\circ) + \\ &+ \underline{I}_2 (0,7042 \angle 1,417^\circ); \end{aligned}$$

в) при длине $l = 1000$ км

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 (0,4957 \angle 3,344^\circ) + \sqrt{3} \underline{I}_2 (226,4670 \angle 87,508^\circ); \\ \underline{I}_1 &= (1 / \sqrt{3}) \underline{U}_2 (3,3406 \cdot 10^{-3} \angle 90,325^\circ) + \\ &+ \underline{I}_2 (0,4957 \angle 3,344^\circ). \end{aligned}$$

15. Постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии:

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch}(\gamma_0 l); \quad \underline{B} = Z_{\text{вол}} \operatorname{sh}(\gamma_0 l); \quad \underline{C} = [\operatorname{sh}(\gamma_0 l)] / Z_{\text{вол}}.$$

Для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ

а) при длине $l = 500$ км

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= 0,8646 \cdot 10^{-3} \angle 0,544^\circ; \\ \underline{B} &= 130,9570 \angle 87,013^\circ \text{ Ом;} \\ \underline{C} &= 1,9318 \cdot 10^{-3} \angle 89,768^\circ \text{ См;} \end{aligned}$$

б) при длине $l = 750$ км

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= 0,7042 \angle 1,417^\circ; \quad \underline{B} = 185,0781 \angle 87,232^\circ \text{ Ом;} \\ \underline{C} &= 2,7303 \cdot 10^{-3} \angle 89,987^\circ \text{ См;} \end{aligned}$$

в) при длине $l = 1000$ км

$$\begin{aligned} \underline{A} = \underline{D} &= 0,4957 \angle 3,344^\circ; \quad \underline{B} = 226,4670 \angle 87,508^\circ \text{ Ом;} \\ \underline{C} &= 3,3406 \cdot 10^{-3} \angle 90,235^\circ \text{ См.} \end{aligned}$$

16. Параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений \underline{Z}_l и \underline{Y}_l с учетом распределенности их параметров по длине линии

$$\underline{Z}_l = Z_{\text{вол}} \operatorname{sh}(\gamma_0 l); \quad \underline{Y}_l = (2 / Z_{\text{вол}}) \operatorname{th}(\gamma_0 l / 2).$$

Для рассматриваемой воздушной линии 500 кВ

а) при длине $l = 500$ км

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 130,9568 \angle 87,013^\circ = (6,8238 + j 130,7789) \text{ Ом;} \\ \underline{Y}_l &= (2,0721 \cdot 10^{-3} \angle 89,516^\circ) = \\ &= (17,5062 + j 2072,0577) 10^{-6} \text{ См;} \end{aligned}$$

б) при длине $l = 750$ км

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 185,0781 \angle 87,232^\circ = (8,9383 + j 184,8622) \text{ Ом;} \\ \underline{Y}_l &= (3,2043 \cdot 10^{-3} \angle 89,402^\circ) = \\ &= (33,4688 + j 3204,1651) 10^{-6} \text{ См;} \end{aligned}$$

в) при длине $l = 1000$ км

$$\begin{aligned} \underline{Z}_l &= 226,4670 \angle 87,508^\circ = (9,8487 + j 226,2527) \text{ Ом;} \\ \underline{Y}_l &= (4,4687 \cdot 10^{-3} \angle 89,217^\circ) = \\ &= (61,1039 + j 4468,2702) 10^{-6} \text{ См.} \end{aligned}$$

Примечание. Соотношения, связывающие напряжения U_1 , U_2 и токи I_1 , I_2 по концам протяженной линии с учетом распределенности их параметров по длине протяженной линии, постоянные пассивного четырехполюсника, определяемые по коэффициентам, входящим в уравнение длинной линии, с учетом распределенности параметров по длине протяженной линии, а также параметры П-образных схем замещения линий сверхвысоких номинальных напряжений \underline{Z}_l и \underline{Y}_l с учетом распределенности их параметров по длине протяженной линии были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 750 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета.

17. Параметры П-образной схемы замещения линии через удельные сопротивление \underline{z}_0 и проводимость \underline{y}_0 и поправочные коэффициенты \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , учитывающие распределенность параметров по длине протяженной линии, определяются как

$$\underline{Z}_l = (\underline{z}_0 l) \underline{K}_Z; \quad \underline{Y}_l = (\underline{y}_0 l) \underline{K}_Y,$$

где $\underline{K}_Z = \operatorname{sh}(\gamma_0 l) / (\gamma_0 l)$; $\underline{K}_Y = \operatorname{th}(\gamma_0 l / 2) / (\gamma_0 l / 2)$.

В качестве первого приближения при определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y также рассчитывались значения $\underline{K}_Z \approx \underline{K}_Z' = 1 + (\gamma_0 l)^2 / 6$ и $\underline{K}_Y \approx \underline{K}_Y' = 1 - (\gamma_0 l)^2 / 12$.

Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ при длине $l = 250, 500, 750$ и 1000 км были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 750 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 рассматриваемого расчета, и приведены в табл. 3.

Определенные по выражениям пункта 18 рассматриваемого расчета зависимости модулей (\underline{Z}_l , \underline{Y}_l) и аргументов (φ_Z , φ_Y) комплексных \underline{Z}_l и \underline{Y}_l для рассматриваемой воздушной линии 750 кВ при разных её длинах адекватно отображают её волновые свойства. Полученные зависимости \underline{Z}_l , \underline{Y}_l , φ_Z и φ_Y от длины линии могут служить эталоном для сопоставления с ними аналогичных зависимостей, полученных при разных допущениях.

Таблица 3 – Точные и приближенные значения поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y , а также \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' для воздушной линии 750 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км			
	250	500	750	1000
\underline{K}_Z	0,9885 └ 0,0413°	0,9544 └ 0,11675°	0,8993 └ 0,3862°	0,8252 └ 0,7244°
\underline{K}_Y	1,0058 └ -0,0207°	1,0238 └ -0,0849°	1,0554 └ -0,1993°	1,1039 └ -0,3835°
\underline{K}_Z'	0,9885 └ 0,0416°	0,9538 └ 0,1723°	0,8961 └ 0,4127°	0,8153 └ 0,8207°
\underline{K}_Y'	1,0058 └ -0,0204°	1,0231 └ -0,0803°	1,0520 └ -0,1758°	1,0925 └ -0,3062°

Анализ данных табл. 3 показывает:

1) поправочные коэффициенты представляют собой практически действительные числа, которые тем ближе к единице, чем меньше длина линии. Для участков линий с длиной 250, 500 и 750 км отличие модулей \underline{K}_Z от 1 составляет 1,2; 4,6 и 10 %, а модулей \underline{K}_Y – 0,6, 2,4 и 5,5 %. Отличием модулей \underline{K}_Z и \underline{K}_Y от 1 (1,2 и 0,6 % соответственно) при длине линии $l \leq 250$ км обычно пренебрегают;

2) погрешность в определении поправочных коэффициентов \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' по приближенным формулам, то есть отличие модулей \underline{K}_Z' от \underline{K}_Z и \underline{K}_Y' от \underline{K}_Y растет с увеличением длины и достигает при $l = 750$ км примерно 0,4 и 0,3 % для \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' . Это дает основание при длинах линии 750 кВ $l \leq 750$ км использовать вместо поправочных коэффициентов \underline{K}_Z и \underline{K}_Y более простые выражения для \underline{K}_Z' и \underline{K}_Y' .

18. Действительные поправочные коэффициенты непосредственно для каждого из сопротивлений и проводимостей схемы замещения рассматриваемой воздушной линии 750 кВ при разных её длинах были рассчитаны по компьютерной программе с использованием удельных параметров линии 750 кВ, определенных в пунктах 1, 2, 3 и 6 данного расчета, и приведены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 показывает, что выводы о возможности отказа от учета распределенности параметров при $l \leq 250$ км, полученные выше (см. табл. 3) при исследовании изменения \underline{K}_Z и \underline{K}_Y (\underline{K}_Z' и \underline{K}_Y'), аналогичны для коэффициентов k_R , k_X , k_G и k_B при $l = 250$ км, значения которых мало отличаются от единицы.

Таблица 4 – Значения поправочных коэффициентов k_R , k_X , k_G , k_B , а также k_R' , k_X' и k_B' или k_X'' и k_B'' для воздушной линии 750 кВ при разных её длинах

Коэффициент	Длина линии l , км			
	250	500	750	1000
k_R	0,9754	0,9017	0,7889	0,6074
k_X	0,9885	0,9540	0,8964	0,8159
k_G	1,0573	1,2290	1,5153	1,9305
k_B	1,0058	1,0231	1,0520	1,0924
k_R'	0,9769	0,9076	0,7920	0,6203
k_X'	0,9885	0,9539	0,8963	0,8157
k_B'	1,0058	1,0231	1,0520	1,0924
k_X''	0,9884	0,9538	0,8960	0,8151
k_B''	1,0058	1,0231	1,0520	1,0924

Сопоставление точных и приближенных значений k_R' , k_X' и k_B' показывает, что допущение об отсутствии потерь на корону, то есть пренебрежение второй слагаемой в формулах расчета k_X и k_B практически не сказывается на значениях k_X' и k_B' ($k_X \approx k_X'$, $k_B \approx k_B'$), а отличие k_R' от k_R при $l = 250$ и 500 км не превосходит 0,15 и 0,65 % соответственно. Переход к рассмотрению идеализированной линии (без потерь) связан только с изменением поправочного коэффициента к индуктивному сопротивлению, при этом отличие k_X'' от k_X' при $l = 250$ и 500 км составляет приблизительно 0,01 %. Таким образом, при длинах линий $l \leq 500$ км в использовании более точных выражений для k_R , k_X , k_G и k_B нет практической необходимости и, в зависимости от принятых допущений, достаточно использовать для расчетов поправочных коэффициентов выражения для k_R' , k_X' и k_B' или для k_X'' и k_B'' .

Полученные в табл. 4 результаты позволяют дополнить полную и расчетную схемы замещения воздушной линии 750 кВ, показанные на рис. 3, а, б схемами, соответствующими следующим случаям:

1) при допущении об отсутствии потерь активной мощности на корону ($G_L = 0$) (см. рис. 3, в), т. е.

$$\underline{Z}_L = R_L + jX_L = r_0 l k_R' + jx_0 l k_X'; \\ Y_L = jB_L = jb_0 l k_B';$$

2) при допущении о полном отсутствии потерь активной мощности ($R_L = 0$; $G_L = 0$) (см. рис. 3, г), т. е.

$$Z_L = jX_L = jx_0 l k_X''; Y_L = jB_L = jb_0 l k_B''.$$

Список литературы

1. Веников В. А. Электрические системы. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения : учеб. пособ. для электроэнерг. вузов : в 7 т. Т. 3 / В. А. Веников, В. В. Худяков, Н. Д. Анисимова и др.; под ред. В. А. Веникова. – М. : Высш. школа, 1972. – 368 с.
2. Расчеты и анализ режимов работы сетей / Н. Д. Анисимова, В. А. Веников, В. В. Ежков и др.; под ред. В. А. Веникова. – М. : Энергия, 1974. – 336 с.
3. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, В. В. Ежков и др.; под ред. В. А. Веникова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
4. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для электроэнерг. спец. / В. В. Ежков, Г. К. Зарудский, Э. Н. Зуев и др.; под ред. В. А. Строева. – М. : Высш. шк., 1999. – 352 с.
5. Барбашов И. В. Параметры и схемы замещения элементов электрических систем в примерах и задачах : учеб. пособ. / И. В. Барбашов, Г. В. Омеляненко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2017. – 158 с.
6. Барбашов И. В. Общая характеристика и основы анализа установившихся режимов современных электрических систем и сетей : текст лекций / И. В. Барбашов. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 240 с.

References (transliterated)

1. Venikov V. A., Khudyakov V. V., Anisimova N. D., etc. *Elektricheskiye sistemy. Peredacha energii peremennym i postoyannym tokom vysokogo napryazheniya* [Electrical systems. Transmission of energy by alternating and direct current of high voltage]. Moscow, High school Publ, 1972. 368 p.
2. Anisimova N. D., Venikov V. A., Ezhkov V. V., etc. *Raschety i analiz rezhimov raboty setey* [Calculations and analysis of operating modes of the networks]. Moscow, Energy Publ, 1974. 336 p.
3. Astakhov Yu. N., Venikov V. A., Ezhkov V. V., etc. *Elektroenergeticheskiye sistemy v primerakh i illyustratsiyakh* [Electric power systems in examples and illustrations]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1983. 504 p.
4. Ezhkov V. V., Zarudsky G. K., Zuev E. N., etc. *Elektricheskiye sistemy i seti v primerakh i illyustratsiyakh* [Electrical systems and networks in examples and illustrations]. Moscow, High school Publ, 1999. 352 p.
5. Barbashov I. V., Omelyanenko G. V. *Parametry i skhemy zameshcheniya elementov elektricheskikh sistem v primerakh i zadachakh* [Parameters and equivalent circuit elements of electrical systems in examples and problems]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2017. 158 p.
6. Barbashov I. V. *Obshchaya kharakteristika i osnovy analiza ustanovivshikhsya rezhimov sovremennykh elektricheskikh sistem i setey* [General characteristics and bases of the analysis of the established modes of modern electrical systems and networks]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ, 2013. 240 p.

Поступила (received) 10.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барбашов Ігор Володимирович (Барбашов Игорь Владимирович, Barbashov Igor Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)1460438; e-mail: i.v.barbashov@gmail.com

Обухов Валерій Романович (Обухов Валерий Романович, Obukhov Valeriy Romanovich) студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (095)1399595; e-mail: prosto.valeriy.o@gmail.com

Риморєв Дмитро Сергійович (Рыморев Дмитрий Сергеевич, Rymoriev Dmytro Serhiyovych) – студент 5 курсу кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел. (050)5225851; e-mail: Rydis@ukr.net